長期施用豬糞尿有機肥對地下水污染之影響及合理施用量之評估

嚴 式 清*

摘要：禽畜排泄物農田利用爲傳統農業中養分流的重要環節，同時亦爲土壤保育的有利措施。深層滲漏而污染地下水之有關因素爲有機物之使用量、土壤性質、作物條件及氣候。台糖公司自營農場施用豬糞尿有四十餘年的經驗，祗有在超量施灌及透水性特高（砂礫地或砂質土壤）之土地上以及施灌後遇大雨時可能發生污染質滲漏現象。地下水污染防治之道是質量平衡與水質監測並重。地下水質監測涉及地下水水文的瞭解，監測井構造、佈置、施工以及採樣分析等因素，準確資料必須有全程的品保品管作業。有機肥料之肥效評估需透過試驗研究分別以短期及長期觀點加以探討方能兼顧資源利用及污染防治之永續經營。台糖公司施用豬糞尿有機肥料在自營農場，以1993年爲例節省化學肥料價值約1200萬元，並未發現任何地下水質劣化現象。

關鍵詞：有機肥料，肥料當量，豬糞尿，地下水污染，環境監測

前 言

自從1972年6月聯合國在斯德哥爾摩舉行"人類環境會議(UN Conference onHuman Environment)"提出"只有一個地球"主題後，加强了全球人類對目前面臨問題的警覺與共識，當前最嚴重的問題是人口爆炸，資源短缺和環境污染。三者之交互影響在謀求對策時必須要有宏觀的眼光和科際整合的技術訴求。施肥問題正是其中具體而微的重要環節。因應人類糧食需求施用肥料追求農業增產是必要的手段。然而在環境保護上肥料是農業的非點源污染已繼工業廢污之後受到更多的關注，開發中國家糧食增產則受到能源與肥料工業的限制，或缺乏適當的施肥依據而導致浪費或環境污染。有機肥料是傳統農業中不可或缺的養分來源，更是現代健康食品的基本要求。動物排泄物用作有機肥料具有節省能源、提供養分、改善農產品品質及保育土壤等多重效益，卻因工業化社會高工資影響而日趨減少，以台灣省爲例，農田自給肥料（包括綠肥、堆肥、人糞尿、畜禽糞尿、草木灰、稻草稻殼等）自民國76年平均每公頃5公噸降至82年之每公頃4.17公噸(1)，距離永續農業所需相差頗大。然而台灣農業受到貿易自由化與國際化影響，一般農作物對有機肥料的投入難望提高。相反的，栽培高經濟作物的果農、花農和菜農卻對有機肥料情有獨鍾，且有過猶不及的偏頗現象，形成對環境相當的衝擊，其中最值得重視的是氮素對地下水質的影響(2)(3)。

據統計(1)台灣地區1993年生產肉豬13,225,000頭，每天約有28,000公噸之豬糞尿，其排泄物一年中所含三要素含量估計約爲氮(N) 52,000公噸、磷(P_2O_5) 28,000公噸、鉀(K_2O) 19,500公噸，如不能全部回歸農田，將對環境造成莫大衝擊。

* 台灣糖業公司生產技術處污染處理工程師

硝態氮(NO_3-N)通過土壤進入地下水系統影響飲用水水質之發現已有半世紀的歷史[4]。飲用水中硝酸根導致嬰兒藍嬰症(blue baby syndrome，學名 methemoglobinemia)之濃度在人類尤低於家畜(45 mg/l vs. 200 mg/l)[5]，硝酸根與胺(amine) 或醯胺(amide)結合而成亞硝胺(nitrosamine)及亞硝醯胺(nitrosamide)類化合物，其中 80 % 經證明有致癌性[6]。地下水之氮素污染源主要來自放牧動物排泄物或氮素肥料的使用管理不當。

有鑑於甘蔗農業長期單作經營可能帶給土壤之不利影響，如所謂的“土壤疲乏(soil fatique)”，台糖公司早在1953年即開始在自營農場推行養豬計劃，把豬糞尿就近施用於蔗田，以補充植物養分及土壤有機質。目前(1994)全年生產肉豬約 650,000頭，所產生之豬糞尿經二級處理後直接或間接製成有機肥料後施用於約50,000公頃之自營農場蔗田。經過四十餘年長期施用豬糞尿有機肥，是否會對環境造成不利影響是一個值得探討的問題。其中涉及用量、用時、施用方法及田間管理等諸多因素，合理施用量所需的有關參數係由多年盆栽或田間試驗來求得，並於各農場建立監測系統來確實掌握土壤和地下水質的可能變化，下面就豬糞尿在土壤中的變化和地下水質監測與污染防治兩方面來討論。

豬糞尿在土壤中的歸趨與肥效

豬糞尿是一種高濃度易分解的有機廢棄物(表一)，在土壤中的變化相當複雜，尤其是氮的部份(圖一)，其肥效速率則僅次於化學肥料，在表面施用時，其氮之損失因田間狀況不同而有7-62 %之差異[7]。養分效率評估中應把固形物部份與尿液部份分開來看，筆者之盆栽及田間試驗結果顯示豬糞尿氮素的肥料當量(相對於硫銨的fertilizer equivalent)在 40-45 %之間，因土壤質地而稍有差別[8]。固體堆肥之肥效與其C/N比有相當關係，Kirchmann用15 N標示之雞糞堆肥試驗結果顯示[9]，堆肥之C/N比10，13，18之三處理，第一年之氮回收率分別爲7%，6%及3%，對照之硫銨爲 53 %；第二年分別爲5%，6%及7%，硫銨爲2%；第三年分別爲2%，2%及1%，硫銨爲1%，綜合三年結果，其氮肥當量爲硫銨之25%[9]。C/N比低者，肥效速，有利於當年作物利用，反之，C/N比高者，第二年之殘效較多。王傳釗等之調查顯示，長期施用豬糞尿對土壤有累積性影響，無論植物養分或有機質均有增加趨勢，同時土壤鹽分及pH亦有提高跡象[10]。由長期施用觀點看，單位面積用量應由總量管制來計算，包括土壤中累積增加之有機質儲存量所衍生之氮素礦化率與礦化量。總量管制不但可據以計算肥效來節省化學肥料的使用，同時可以減少環境污染的發生。

豬糞尿中的植物養分以氮之變化運移較爲複雜，磷雖爲水污染之重要元素，除非逕流沖蝕表土污染地表水，在土壤中則相當安定，污染地下水的機會不多。氮則不然，硝酸根之活動度大，其滲漏損失因施肥量、放牧密度、土壤質地、作物種類、田間操作及降雨因素等不同而有明顯差異，由Owens彙集之資料顯示，地下水中之硝態氮濃度可由較低之2.9mg/l至最高之195mg/l，變化幅度高達數十倍[11]。

以糞尿液灌溉言，單位面積養分負荷率及養分之均勻分佈爲兩個重要因素，研究指出[8]，糞尿液中之銨態氮，在適當田間條件配合下，最多可替代 75 %左右之化學氮肥，如以50 %替代率來計算，年產一萬頭之養豬場，其畜殖排泄物約需 200公頃之蔗園來消納。如果承受之土地面積不足即易發生超量負荷而導致作物品質降低(延遲成熟，糖分減少)及環境污染。以1993年爲例，台糖公司利用豬糞尿施灌，爲自營農場節省化學肥料價値分別爲氮 450萬元，磷 240萬元及鉀 480萬

元新台幣，合計約1200萬元，亦因此減少了植物養分進入地下水的機會。

其次是養分分佈的均勻問題，固體有機肥料以機械撒播均勻度大致良好。糞尿液灌溉則決定於水分分佈的灌溉效率。灌溉效率受土壤入滲率、畦溝坡度、長度、溝底平順度、灌水總量、水流大小、延時及灌溉管理等諸多因素的影響。一般蔗田的灌溉效率甚少超過 50 %(包括輸送效率)，但有降雨及地下水供應的均勻性可加彌補。兼具施肥目的之糞尿液灌溉則不同，如其效率偏低，不但影響養分供應的均一性，且易導致深層滲漏而污染地下水，爲有機肥料利用上不可疏忽之事。

表一、豬糞尿二級處理 (兼暴氣) 前後之性質

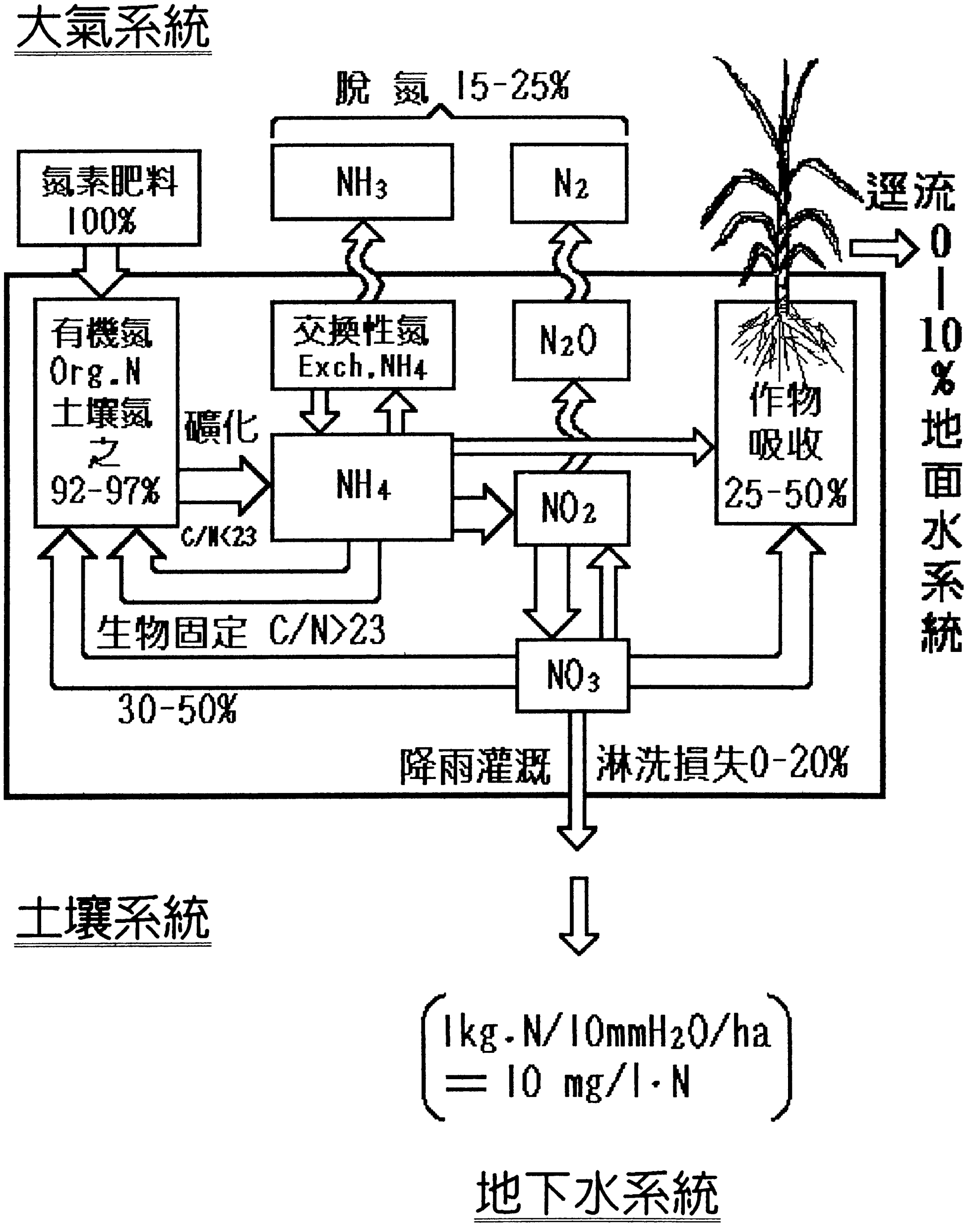
Table 1. Characteristics of swine wastes before and after secondary (facultative and aeration) treatment*

	進流液 Influent			出流液 Effluent			減低率 Rate of reduction %
	Max.	Min.	Ave.	Max.	Min.	Ave.	
pH	8.2	6.3	7.25	7.8	6.8	7.27	
SS(mg／l)	3,283	210	1,857	368	26	165	91
BOD_5 (mg／l)	3,715	909	2,197	339	49	155	93
COD(mg／l)	7,788	1,234	4,319	763	162	365	92
EC(μS／cm)	5,040	1,598	3,037	2,850	438	1,502	51
T-N(mg／l)	678	61	261	228	19	92	65
T-P(mg／l)	223	26	75	59	5	27	64

地下水污染與水質監測

硝酸根進入地下水因藍嬰症之發現而引起各界之重視，但到目前爲止，環保單位並未訂出地下水質管制的標準，世界衛生組織所訂飲用水質標準硝態氮(NO_3 -N)10 mg/l爲上限，另外尙有放流水質標準、灌溉水質標準，如借用來管制地下水，或失之過嚴，或失之過寬，實有待商榷。

預測地下水硝態氮濃度並不容易，70年代Fried等以長期施肥的觀念來探索硝酸根的淋洗問題[12]，結論認爲肥料效率是決定性因素，祇要施肥量有增產反應，氮素進入地下水的機會就不多。在此同時，Tanji等用程式模擬來預測硝態氮之淋洗損失[13]。嗣後電腦模擬研究地下水污染進入百家爭鳴時代。關於硝態氮淋洗損失，Barry等以大面積長時間氮收支(nitrogen budget)方法之研究或可作爲代表[14]，地下水硝酸根之濃度用氮收支之餘量及地下水補注量來估算，再與實測排水含氮量作比較。有關氮之各種變化常數大致可由文獻及實測獲得，降雨之補注率則較難準確估算，尤其像台灣地區的降雨型態可能更難。不過大面積長時間的研究 (一次或多次輪作循環) 較具實用意義。可以避免局部的變異性，如漏斗流(funnelling)所產生的特殊現象。



圖一、土壤與環境中之氮循環

Figure 1. The nitrogen cycle in soil and environment

表二、台糖公司自營農場地下水水質監測記錄統計表 (1993.1-12)

Table 2. Characteristics of swine wastes before and after secondary (facultative and aeration) treatment*

監測地區 Monitoring area	觀測井位 Well location	取樣日期 Date of Sampling	檢驗項目 Item monitored													備註 Remarks
			PH	BOD(mg／l)			NH_3 N(mg／l)			NH_4 N(mg／l)			EC(μ S／cm)			
				Max	Min	Ave	Max	Min	Ave	Max	Min	Ave	Max	Min	Ave	
43農場 Plantations 17420 ha	上游 up stresm	每月一次 monthly	7.38	19.1	MD	1.03	24.5	MD	0.92	5.84	MD	0.75	34,200	129	791*	1.NO_3 -N：N.D.<0.063 2.NH_4 -N：N.D.<0.045
	下游 down stream		7.40	49.0	MD	1.14	39.2	MD	1.55	10.2	MD	0.61	25,200	130	874*	

* 東石農場(海浦地)導電度資料僅採用最高值但未列入統計。

EC data of Tung-shin farm are excluded in mean value due to its special olcality (reclaimed tidal land)

無論如何，自然界的土壤與水文變化頗大，許多預測模式僅能達到概念性的啓示。最可靠的預防手段還是要靠建立地下水監測系統。爲求達到地下水質監測目的，監測井之設置應考慮下列數項因素：包括(1)井位，(2)井體結構，(3)井深，(4)設井施工，(5)取水深度，(6)取樣頻度，以及(7)分析項目，茲分述如下：

(1)井位：

對於全面性的地下水質監測，可用網格式佈置，如以若干平方公里設置一個或一組監測井。對於特定污染源的監測，先瞭解該地區之地下水文之流向，梯度及含水層深度，在監測範圍之上游設置一個(或一組)對照井(背景)，下游設置三個(或三組)監測井，在選擇施工井位時應避免過於接近水塘或排水幹線。並考慮井體安全之維護及取樣之方便。

(2)井體結構：

對於農地地下水水質監測，爲避免降雨、灌溉、排水之直接干擾，地面以下10公尺左右之井管應不設濾水孔，並於管外加封粘土層以防止壁流，10公尺以下之濾水管深度至少應及於最近之不透水層及旱季之最低水位以下。井管直徑以便於取樣及量測靜水位爲原則，一般用3至6吋之塑膠管，如水位較深需用潛水式抽水機取樣，管徑必須大於取樣工具。如地下水位過深且慮及井體成本，可改用採樣筒以縮小井徑。

(3)井深：

井深是決定監測井成本的主要因素，對於特定污染源之監測，井深應依含水層之深度分別取樣，故一組井數應有二個以上深度。對於一般農地施肥或廢棄物土壤處理，單一監測井深度至最高含水層即可。在台灣西部平原，30公尺足以應付，但靠近內陸的丘陵地，井深至少60公尺以上，否則難以取到水樣。爲求延長監測井利用年限，井底另需增加10公尺左右之沉砂井管。

(4)設井施工：

監測井施工以旱季爲宜，井管施放、洗井等步驟必須確實，如有彎曲不但影響取樣，亦

縮短井齡，施工所得之地層資料(log)應妥爲保管，以備地下水質研判時參考。

(5)取水深度：

地下水取樣，在水位較高地區 (6公尺以內)，移動式小抽水機即可，如水位過深，必須用潛水式抽水機或採樣管，抽水式取樣可在測量靜水位後先抽除井內原有水體後再抽取新滲入之地下水爲樣本。如用採樣管，則不易採取新滲入水樣，但在避免擾動的情形下，可選擇採取不同深度的水樣。

(6)取樣頻度：

一般水質分析項目爲便於分析統計每月採樣一次，重金屬等項目每六個月或一年或分旱雨季分別採樣分析一次。

(7)分析項目：

由於至今並無地下水水質管制標準，可依不同目的選擇不同標準分析項目及管制濃度，如用作灌溉以灌溉水質項目，用作飲用水以飲用水水質項目作分析，以有機肥料施用地區而言，可在一般性項目如pH、EC之外另再分析BOD、NO_3-N及若干重金屬如Cu、Cr、Cd、Zn、As等。

對於特定污染源地下水質監測，除必須以不同深度之組井採取不同含水層外，更應分析與污染源有關之污染質，如TOC、苯類、酚類、氯化有機物、病原菌等。

在地下水採樣分析過程中必須遵循品保品管(QA/QC)作業規範，以確保結果之可靠性。

防治施肥可能導致的地下水污染可從肥料管理與田間管理兩方面著手。肥料管理包括適當施肥量的推荐，堆肥材料及成品之防雨儲存，以免施肥過量及儲運過程中危及環境的淋洗洩漏。田間管理包括與作物生長期的配合，不可利用休閒地來處理含氮廢棄物，注意天氣預報，避免施肥後之暴雨淋洗，以耕犁操作促進肥料與土壤的結合，以及切斷連續性的淋洗管道(大型土壤孔隙及蟲孔)等。

台糖自營農場利用有機肥料及地下水質監測案例

台糖公司目前有28個養豬場，畜殖廢棄物及相關衍生的有機肥料利用公司149個農場中輸運施用比較方便的部份蔗園來消納，以1993年爲例，共有43個農場17,420公頃蔗田接受豬糞尿及相關之有機肥料，每一農場至少設置 4 口地下水監測井，每月取樣一次，分析 pH、EC、BOD、NH_4-N、NO_3-N及半年一次重金屬類之Cu、Mn、Cd、Zn、Cr及As等。表二所示爲199 3年全年的統計分析，因地下水中極少發現重金屬，故重金屬部份並未列出。表二顯示，除特殊因素影響水質測値有偏高現象外，整體而言，農場地下水質並未因有機肥料之使用 (包括化學肥料之硫銨及尿素) 有明顯之變化，至於少數偏高測值可以個別案例加以檢討，假設以平均值之 5 倍爲上限 (參考NO_3-N) 警戒值，BOD爲 6 mg/l，NO_3-N爲 8 mg/l，NH_4-N爲4mg/l，在一年2,000餘個水樣中，BOD、NO_3-N、NH_4-N三項超過上述警戒值約有10次(表三)，佔全部樣品約 0.5 %，且均非連續出現，表示屬於單一施灌作業所出現之狀況，再以出現之農場別來探討，BOD超限之10次中，十分之六爲粘土地，十分之四爲砂土及砂礫地，其中粘土地農場新營區主要受酒精醪施放之影響，因其BOD超過100,000 mg/l，雖其噴洒量每公頃不到 100 M^3，如降雨期離施放期過近，仍未達到完全的自然降解，對細質地土壤言可能引起局部的缺氧現象。至於NO_3-N及NH_4-N，除其中一次

係上游民井水中含NO_3-N甚高(29.5 mg/ l)原因不明外，其餘台糖自營農場監測井水含氮較高者70%以上爲砂土或砂礫地，顯與土壤滲透率高以及施用後遇降雨水分補注較多有關。

結　論

1.有機肥料之使用，其肥料當量可因作物、土壤、肥料種類與施用方法等不同而不同，必須經由試驗研究來探求。以對環境污染最有影響之氮素而論，其對於硫銨之當量值約在25-45%之間。基於污染防治考量，施氮總量不可超過作物所需。

2.應避免利用休閒地及暴雨季節使用肥料或處理有機廢棄物，對於透水性高之砂土地或砂礫地尤應注意施肥量及施肥方法，以減少污染質之深層滲漏污染地下水，堆肥或有機肥料必須有較大的儲存設備，以應季節性需要並避免淋洗逕流對環境之衝擊。

3.地下水監測井設置應妥善規劃設計，以提高監測數值之準確性，一般性監測必須有長時間的記錄，特殊污染源之監測則需不同深度之組井，由不同含水層取樣方能達到監測的目的。

表三　地下水生化需氧量、硝態氮及銨態氮含量偏高(大於平均值5倍)之個案

Table 3. BOD, NO_3-N and NH_4-N content of ground water in abnormal cases (concentration higher than 5 folds of mean value)

地點 Locality	生化需氧量 BOD >6mg／l	出現次數 Case of occurrence	地點 Locality	硝態氮 NO_3-N >8mg/l	出現次數 Case of occurrence	地點 Locality	硝態氮 NH_4-N >4mg/l	出現次數 Case of occurrence
新營 Hsinying	7.6~19.2(1)	6	月眉 Yuchmei	29.0	1	溪湖 Chihu	4.13	1
仁德 Jente	8.0, 49.0	2	斗六 Touliu	9.50, 11.0	2	北港 Peikang	9.60	1
南州 Nanchow	6.38, 8.20	2	北港 Peikang	10.1	1	蒜頭 Suantow	5.0, 6.0	2
			南靖 Nantsing	29.5(2)	1	新營 Hsinying	5.84	1
			高雄 Kaohsiung	34.2(3)	1	仁德 Jente	10.2	1
			屏東 Pingtung	10.5, 39.1	2	屏東 Pingtung	6.3	1
			南州 Nanchow	24.9	1	南州 Nanchow	4.0, 5.8	2

(1) 副產酒精醪　Alcohol slops

(2) 上游民井　Up stream farmer's well

(3) 糖廠廢水　Sugar mill wastewaters

參考文獻

(1) 台灣農業年報1987、1993，台灣省政府農林廳。

(2) 王銀波、譚鎮中、黃紋賓，1994 肥料施用與土壤水中銨與硝酸根之分佈 I 、蔬菜園與水稻田之比較、土壤與肥料污染研討會論文集 pp.131-143。

(3) 劉玉雪、徐玉標 1994 台灣省嚴重污染灌區之土壤、作物與地下水之惡化調查(高雄二仁溪灌區)，83年農業工程研討會論文集 pp.217-229。

(4) Campell J.B.,A.N. Davis and P.J.Myhr. 1954. Methemoglobinemia of livestocks caused by high nitrate content of well water. Can.J. Camp. Med. 18:93-101

(5) Lal R. and B. A. Stewart. 1994. Soil Processes and Water Quality. Lewis Publishers. Ann Arber, Mi. USA. p.5

(6) OECD (Organization for Economic Co-operation and Development).1986. Water Pollution by Fertilizers and Pesticides. OECD Publications. Paris.

(7) Kirchmann H. 1994. Animal and municipal organic wastes and water quality. In Soil Processes and Water Quality. p.188.

(8) 嚴式清 1986 豬糞尿農地消納之研究 中國農業工程學報 32:3:34-44。

(9) kirchmann H. 1989. A 3-year N balance study with aerobic, anaerobic and fresh 15N-labelled poultry manure. In J. A. Hansen and K. Henriksen (eds) Nitrogen in Organic Wastes Applied to Soils. Academic Press. London, England. pp.113-125.

(10) Wang C. C. and I. J. Fang. 1978. The effect of the long-term application of hog wastes on the properties of TSC's sugarcane fields. Taiwan Sugar. Vol. 25, pp.196-206.

(11) Owens L. B. 1994. Impact of soil N management on the quality surface and subsurface water. In Soil Processes and Water Quality. pp.146-151.

(12) Fried M., K. K. Tanji, and R. M. Van De Pol. 1976. Simplified long-term concept for evaluating leaching of nitrogen from agricultural land. J. Environ. Qual. 5:197-200.

(13) Tanji K. K., M. Fried, and R. M. Van De Pol. 1977. A steadystate conceptual nitrogen model for estimating nitrogen emissions from cropped land. J. Environ. Qual. 6:155-159.

(14) Barry D. A. J. , D. Goorahoo, and M. J. Goss. 1993. Estimation of nitrate concentrations in groundwater using a whole farm nitrogen budget. J. Environ. Qual. 22:767-775.

EVALUATION OF PROPER RATE OF LONG-TERM APPLICATION OF HOG MANURE AND ITS IMPACT ON GROUND WATER QUALITY

S. C. Yen

Abstract

Utilization of animal wastes in farming land is an important section of nutrient flow in traditional agriculture. It is also a good management pratice for soil conservation. Ground water pollution by deep percolation of pollutants is closely related to the loading rate of manure, soil characteristics, crop and field management, and climatic conditions.

Taiwan Sugar Corporation （TSC） has more than 40 years of experience in land application of hog manure. Deep percolation of nitrate might occur only on very coarse-textured soils with over loading of organic fertilizer followed by heavy rain.

Effective control of ground water pollution mainly depends on mass balance of manuring practice and monitoring of the environment. Monitoring of ground water quality involves hydrology, well intallation, water sampling and chemical analyses. A QA/QC program is required in order to obtain good results.

Fertilizer equivalent of hog manure was evaluated by a series of lysimeter and field experiments for the purposes of resource recovery and pollution abatement in a sustainable sugarcane agriculture. Hog manure application for chemical fertilizer subst itution saved about 12 million NT$ in 1993 in TSC's sugarcane plantations without any adverse effect on ground water quality.

key words ： organic fertilizer, fertilizer equivalent, swine wastes, ground water pollution, environmental monitoring.